

Электрически управляемые структуры на основе твердых растворов $BaZr_xTi_{1-x}O_3$ и $BaSn_xTi_{1-x}O_3$ для СВЧ-применений

А. В. Тумаркин ¹✉, Е. Н. Сапего ¹, А. Г. Гагарин ¹, Н. В. Мухин ²

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

² Университет прикладных наук Бранденбурга, Бранденбург-на-Гавеле, Германия

✉ avtumarkin@yandex.ru

Аннотация

Введение. Проведено экспериментальное исследование структурных и электрофизических свойств многокомпонентных пленок твердых растворов титаната-цирконата бария и титаната-станната бария на подложках сапфира. Данные материалы являются альтернативой более исследованному титанату бария-стронция для использования в СВЧ-технике ввиду сравнительно высокой управляемости. В данной статье показано, что при использовании постростового высокотемпературного отжига на подложке формируются пленки с компонентным составом, близким к составу распыляемых мишеней. Определены оптимальные температуры осаждения тонких пленок титаната-цирконата бария и титаната-станната бария для получения наилучших электрофизических параметров.

Цель работы. Исследование структурных и СВЧ-свойств $BaZr_xTi_{1-x}O_3$ (BZT)- и $BaSn_xTi_{1-x}O_3$ (BSnT)-пленок на диэлектрических подложках. Данные сегнетоэлектрические материалы перспективны с точки зрения потерь и нелинейности, а формирование планарных структур на основе этих материалов на диэлектрической подложке позволяет обеспечить существенно больший уровень рабочей мощности СВЧ-устройства.

Материалы и методы. Кристаллическая структура и фазовый состав полученных пленок исследовались методом рентгеновской дифракции с помощью дифрактометра ДРОН-6 на эмиссионной спектральной линии $CuK_{\alpha 1}$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Измерения емкости C и добротности $Q = 1/\text{tg } \delta$ конденсаторов проводились на частотах 1 и 3 ГГц с помощью резонатора и векторного анализатора НР 8719С.

Результаты. Установлено, что высокотемпературный отжиг после осаждения пленки существенно влияет на кристаллическую структуру, фазовый состав пленок и их электрические характеристики. Впервые продемонстрирован низкий уровень диэлектрических потерь планарных емкостных элементов на основе пленок титаната-станната и титаната-цирконата бария в частотном диапазоне 1...60 ГГц при приемлемой управляемости.

Заключение. Результаты свидетельствуют о перспективности использования тонких сегнетоэлектрических пленок твердых растворов $BaSn_{0.5}Ti_{0.5}O_3$ и $BaZr_{0.5}Ti_{0.5}O_3$ в устройствах СВЧ-диапазона.

Ключевые слова: сегнетоэлектрические тонкие пленки, цирконат-титанат бария, станнат-титанат бария, высокочастотное магнетронное распыление, рентгеновская дифрактометрия

Для цитирования: Электрически управляемые структуры на основе твердых растворов $BaZr_xTi_{1-x}O_3$ и $BaSn_xTi_{1-x}O_3$ для СВЧ-применений / А. В. Тумаркин, Е. Н. Сапего, А. Г. Гагарин, Н. В. Мухин // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 2. С. 74–81. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-2-74-81

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Источник финансирования. Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации № 075-01024-21-02 от 29.09.2021 (проект FSEE-2021-0014).

Статья поступила в редакцию 01.12.2021; принята к публикации после рецензирования 14.01.2022; опубликована онлайн 27.04.2022

Electric Tunable Structures Based on $\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ and $\text{BaSn}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ Solid Solutions for Microwave Applications

Andrey V. Tumarkin ¹✉, Evgeny N. Sapego ¹, Alexander G. Gagarin ¹, Nikolay V. Mukhin ²

¹ Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

² University of Applied Sciences Brandenburg, Brandenburg an der Havel, Germany

✉ avtumarkin@yandex.ru

Abstract

Introduction. An experimental study of the structural and electrophysical properties of multicomponent films of solid solutions of barium titanate-zirconate and barium titanate-stannate on sapphire substrates has been carried out. These materials are an alternative to the more studied barium-strontium titanate for use in microwave technology, due to the relatively high controllability. In this paper, it is shown that when using post-post high-temperature annealing, films with a component composition close to the composition of the sprayed targets are formed on the substrate. Optimal deposition temperatures of thin films of barium titanate-zirconate and barium titanate-stannate have been determined to obtain the best electrophysical parameters.

Aim. Investigation of structural and microwave properties of $\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ (BZT) and $\text{BaSn}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ (BSnT) films on dielectric substrates. These ferroelectric materials are promising in terms of losses and nonlinearity, and the formation of planar structures based on these materials on a dielectric substrate allows for a significantly higher level of operating power of the microwave device.

Materials and methods. The crystal structure and phase composition of the obtained films were studied by X-ray diffraction using a DRON-6 diffractometer on the emission spectral line $\text{CuK}_{\alpha 1}$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Capacitance C and Q -factor ($Q = 1/\text{tg } \delta$) of capacitors were measured at frequencies of 1 and 3 GHz using a resonator and an HP 8719C vector analyzer.

Results. It is established that high-temperature annealing after film deposition has a significant effect on the crystal structure, phase composition of films and their electrical characteristics. For the first time, a low level of dielectric losses of planar capacitive elements based on titanate-stannate and barium titanate-zirconate films in the frequency range of 1...60 GHz with acceptable controllability has been demonstrated.

Conclusion. The results obtained indicate the prospects of using thin ferroelectric films of $\text{BaSn}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ and $\text{BaZr}_{0.5}\text{Ti}_{0.5}\text{O}_3$ solid solutions in microwave devices.

Keywords: ferroelectric thin films, barium zirconate-titanate, barium stannate-titanate, high-frequency magnetron sputtering, X-ray diffractometry

For citation: Tumarkin A. V., Sapego E. N., Gagarin A. G., Mukhin N. V. Electric Tunable Structures Based on $\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ and $\text{BaSn}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ Solid Solutions for Microwave Applications. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 2, pp. 74–81. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-2-74-81

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Source of financing. The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation № 075-01024-21-02 dated 29.09.2021 (grant number no. FSEE-2021-0014).

Submitted 01.12.2021; accepted 14.01.2022; published online 27.04.2022

Введение. Электроника сверхвысоких частот (СВЧ) является одной из самых динамично развивающихся областей современной техники. Приборы и устройства, работающие в СВЧ-диапазоне, применяются в системах телекоммуникаций, радиолокации и передачи данных. Развитие СВЧ-электронной компонентной базы (ЭКБ) является обязательным условием для улучшения технических характеристик СВЧ-систем и увеличения скорости обработки информации.

Сегнетоэлектрики (СЭ) представляют большой интерес для СВЧ-электроники в силу высокой диэлектрической нелинейности и малых потерь на частотах свыше 1 ГГц. На основе СЭ-материалов разработаны и реализованы лабораторные макеты фазовращателей, управляемых фильтров, линий задержки и фазированных антенных решеток. Среди исследуемых сегодня сегнетоэлектриков наиболее привлекательны для использования на СВЧ оксидные

Электрически управляемые структуры на основе твердых растворов

$\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ и $\text{BaSn}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ для СВЧ-применений

Electric Tunable Structures Based on $\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ and $\text{BaSn}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ Solid Solutions for Microwave Applications

материалы типа перовскита. Характерная особенность структуры кристаллов этой группы – наличие кислородного октаэдра, внутри которого располагается ион Ti или другой ион с малым ионным радиусом. Такие сегнетоэлектрики могут образовывать многокомпонентные твердые растворы, что позволяет создавать материалы, электрофизические свойства которых изменяются в широких пределах. На основе титаната бария (BaTiO_3) исследовано большое количество твердых растворов с замещением атомов Ba или Ti другими элементами. Но если СВЧ-свойства твердых растворов титаната бария-стронция $\text{Ba}_x\text{Sr}_{1-x}\text{TiO}_3$ (BST) исследованы достаточно подробно, то информация о характеристиках твердых растворов титанатов-цирконатов и титанатов-станнатов бария $\text{BaTi}_x\text{Zr}_{1-x}\text{O}_3$ (BZT) и $\text{BaTi}_x\text{Sn}_{1-x}\text{O}_3$ (BSnT) в современной литературе представлена лишь несколькими работами [1–5] с отрывочным описанием их низкочастотных свойств в диапазоне 100 кГц...1 МГц, что не позволяет судить о потенциале данных твердых растворов для СВЧ-применений.

Методы. Пленки формировались методом высокочастотного магнетронного распыления керамических мишеней $\text{BaTi}_{0.5}\text{Sn}_{0.5}\text{O}_3$ и $\text{BaTi}_{0.5}\text{Zr}_{0.5}\text{O}_3$ на подложках поликристаллического Al_2O_3 . Температура подложки варьировалась от 650 до 850 °С. В качестве рабочего газа использовалась смесь аргона и кисло-

рода в соотношении $\text{Ar}/\text{O}_2 = 80/20$. Давление рабочего газа в процессе осаждения составляло 2 Па. После осаждения пленки охлаждались в атмосфере рабочего газа со скоростью 2...3 °С/мин. Толщина пленок составляла 500 нм. Полученные образцы подвергались высокотемпературному отжигу на воздухе при 1100 °С в течение 2 ч.

Кристаллическая структура и фазовый состав полученных пленок исследовались методом рентгеновской дифракции с помощью дифрактометра ДРОН-6 на эмиссионной спектральной линии $\text{CuK}_{\alpha 1}$ ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$). Для электрофизических исследований на основе пленок BSnT и BZT были сформированы планарные конденсаторы, ширина зазора в которых составляла 5 мкм. Верхние электроды конденсаторов были изготовлены посредством термического осаждения пленки Cu толщиной 1 мкм с адгезионным подслоем хрома с последующей литографией и химическим травлением.

Измерения емкости C и добротности $Q = 1/\text{tg } \delta$ конденсаторов проводились на частотах 1 и 3 ГГц с помощью резонатора и векторного анализатора НР 8719С. Резонатор обеспечивает ненагруженную добротность 1000, погрешность измерения емкости и добротности 1 и 5 % соответственно, возможность подачи управляющего напряжения U до 1000 В, что соответствует напряженности управляющего поля 200 В/мкм. Управляемость конденсаторов рассчитывалась как отношение емкостей при нулевом и максимальном приложенном напряжениях

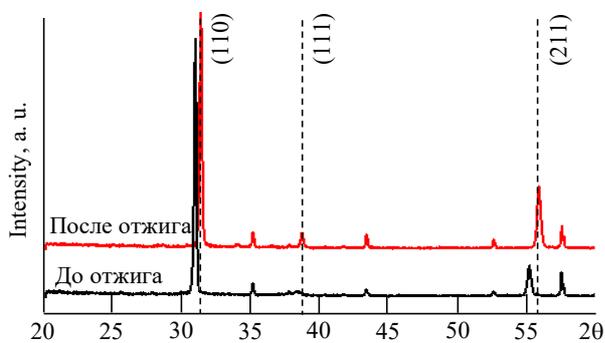


Рис. 1. Результат отжига для твердого раствора титаната-станната бария при составе рабочего газа $\text{Ar}/\text{O}_2 = 80/20$

Fig. 1. Annealing result for a solid solution of barium titanate-stannate with the composition of the working gas $\text{Ar}/\text{O}_2 = 80/20$

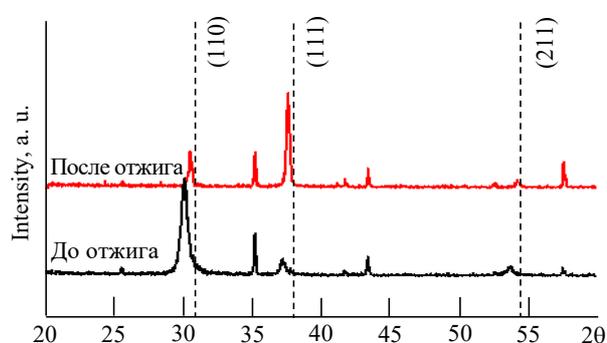


Рис. 2. Результат отжига для твердого раствора титаната-цирконата бария при составе рабочего газа $\text{Ar}/\text{O}_2 = 80/20$

Fig. 2. Annealing result for a solid solution of barium titanate-zirconate with the composition of the working gas $\text{Ar}/\text{O}_2 = 80/20$

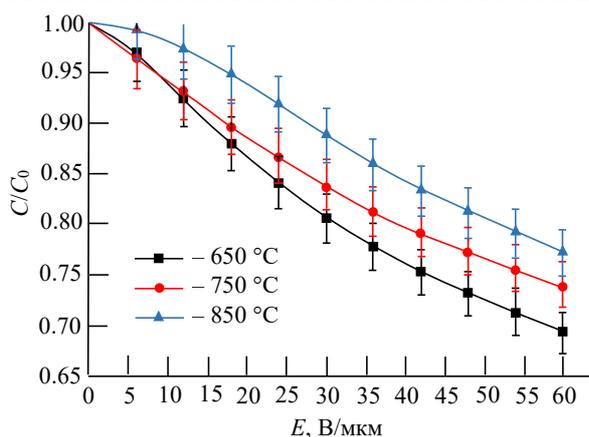


Рис. 3. Нормированная емкость конденсаторов на основе пленок титаната-станната бария в зависимости от температур осаждения после отжига

Fig. 3. Normalized capacitance of capacitors based on barium titanate-stannate films depending on deposition temperatures after annealing

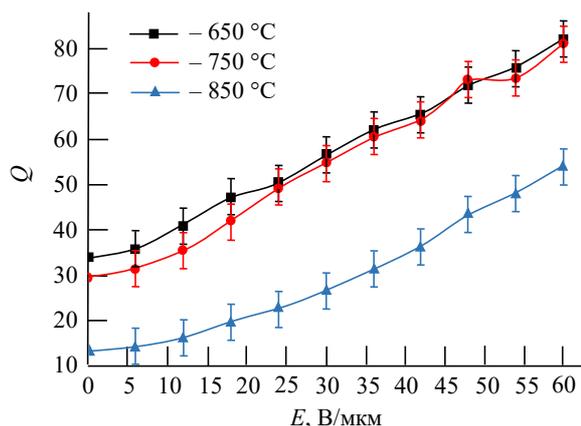


Рис. 4. Добротность конденсаторов на основе пленок титаната-станната бария в зависимости от температур осаждения после отжига

Fig. 4. Q-factor of capacitors based on barium titanate-stannate films depending on the deposition temperature after annealing

управления: $n = C(0 \text{ В}) / C(U_{\text{max}})$. Характеризация образцов на частоте 60 ГГц проводилась по методике открытого резонатора (Фабри–Перо).

Результаты. На рис. 1 и 2 представлены дифрактограммы пленок BSnT и BZT, осажденных при температуре подложки 800 °С, до и после высокотемпературного постростового отжига на воздухе. Штриховые линии соответствуют угловым положениям рефлексов для состава распыляемых мишеней. Хорошо видно смещение рентгеновских рефлексов в сторону больших углов для образцов, подвергнутых

отжигу, что свидетельствует об изменении состава твердого раствора и его приближении к составу распыляемой мишени в результате высокотемпературной обработки. Данная тенденция проявляется для всех пленок, осажденных в исследуемом температурном диапазоне с последующим отжигом, и более выражена для титаната-станната бария. Согласно приведенным дифрактограммам высокотемпературный отжиг на воздухе является необходимым технологическим приемом для формирования перовскитной структуры твердых растворов титанатов-цирконатов и титанатов-станнатов бария.

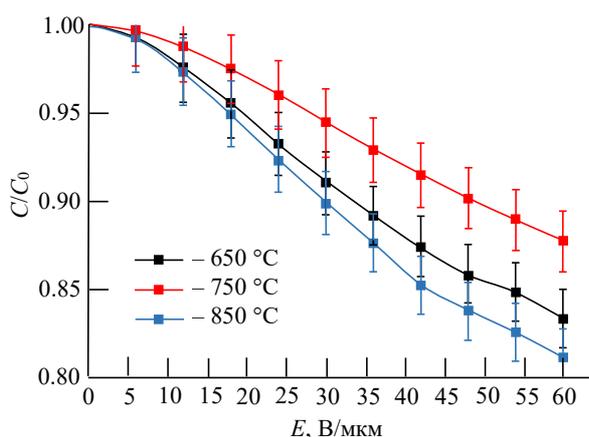


Рис. 5. Нормированная емкость конденсаторов на основе пленок титаната-цирконата бария в зависимости от температур осаждения после отжига

Fig. 5. Normalized capacitance of capacitors based on barium titanate-zirconate films depending on deposition temperatures after annealing

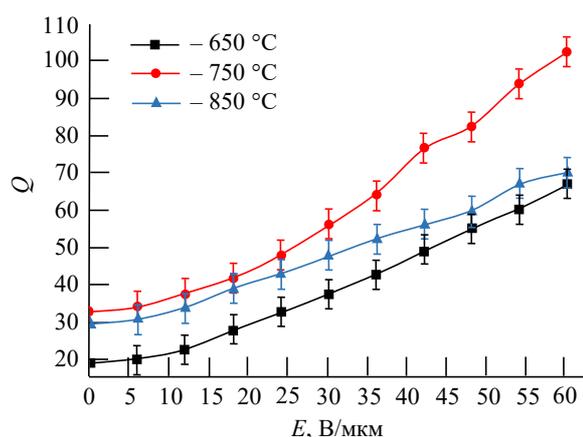


Рис. 6. Добротность конденсаторов на основе пленок титаната-цирконата бария в зависимости от температур осаждения после отжига

Fig. 6. Q-factor of capacitors based on barium titanate-zirconate films depending on the deposition temperature after annealing

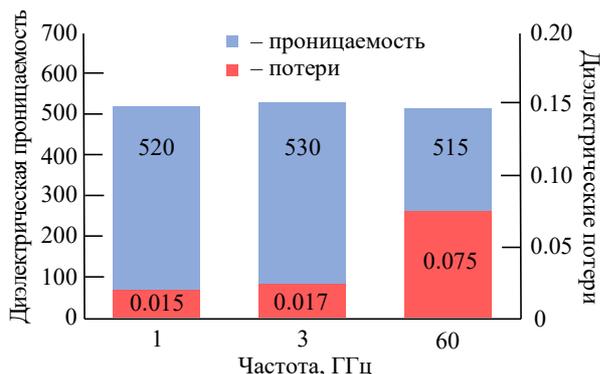


Рис. 7. Диэлектрическая проницаемость и потери BSnT-пленок на подложках поликора, измеренные в частотном диапазоне 1...60 ГГц после отжига

Fig. 7. Permittivity and losses of BSnT films on polycore substrates, measured in the frequency range 1...60 GHz after annealing

Для изучаемых твердых растворов исследовалась зависимость электрофизических свойств пленок от температуры их осаждения на частоте 3 ГГц, после того как пленки были подвергнуты отжигу. На рис. 3, 4 и 5, 6 представлены зависимости нормированной на максимальное значение емкости и добротности планарных конденсаторов на основе BSnT- и BZT-пленок соответственно. Погрешность измерения относительной емкости составляет 0.05 о. е., погрешность данных добротности равна четырем.

Из рисунков следует, что электрические свойства исследуемых твердых растворов по-разному зависят от температуры осаждения пленок. Так конденсаторы на основе пленок титаната-станната бария, осажденных при 650 °С, демонстрируют наибольшую управляемость и наименьшие потери по сравнению с пленками, осажденными при более высоких температурах подложки (см. рис. 3 и 4). Для титаната-цирконата бария, напротив, улучшение электрофизических свойств наблюдается при повышении температуры подложки (см. рис. 5 и 6). Данные тенденции, очевидно, зависят от различного влияния высокотемпературной обработки на структуру пленок BSnT и BZT (см. рис. 1 и 2).

Исследования электрических свойств конденсаторов на основе пленок BSnT и BZT,

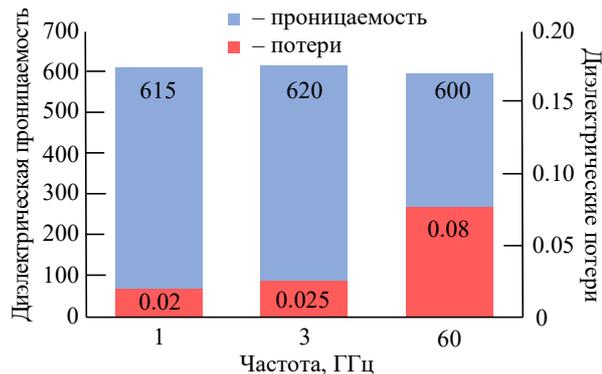


Рис. 8. Диэлектрическая проницаемость и потери BZT-пленок на подложках поликора, измеренные в частотном диапазоне 1...60 ГГц после отжига

Fig. 8. Permittivity and losses of BZT films on polycore substrates, measured in the frequency range 1...60 GHz after annealing

осажденных при температуре 800 °С и отожженных на воздухе, проводились в частотном диапазоне от 1 до 60 ГГц (рис. 7 и 8). Данные измерений подтверждают отсутствие частотной дисперсии диэлектрической проницаемости исследуемых твердых растворов, а также приемлемый для применений уровень потерь. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности использования тонких сегнетоэлектрических пленок твердых растворов $BaSn_{0.5}Ti_{0.5}O_3$ и $BaZr_{0.5}Ti_{0.5}O_3$ в устройствах СВЧ-диапазона.

Заключение. В статье описаны структурные свойства сегнетоэлектрических пленок титаната-станната и титаната-цирконата бария на подложках поликора и сверхвысокочастотные характеристики планарных емкостных элементов на их основе. Установлено, что высокотемпературный отжиг после осаждения пленки существенно влияет на кристаллическую структуру, фазовый состав пленок и их электрические характеристики. Впервые продемонстрирован низкий уровень диэлектрических потерь планарных емкостных элементов на основе пленок титаната-станната и титаната-цирконата бария в частотном диапазоне 1...60 ГГц при приемлемой управляемости.

Авторский вклад

Тумаркин Андрей Вилевич – руководство и постановка исследований, обсуждение результатов, структурные измерения.

Сапего Евгений Николаевич – формирование пленок, структурные исследования.

Гагарин Александр Геннадьевич – электрофизические исследования.
Мухин Николай Вячеславович – теоретические исследования оптимального состава сегнетоэлектрического твердого раствора.

Author's contribution

Andrey V. Tumarkin, management and formulation of research, discussion of results, structural measurements.
Evgeny N. Sapego, film formation, structural studies.
Alexander G. Gagarin, electrophysical investigation.
Nikolay V. Mukhin, theoretical investigations of the optimal composition of ferroelectric solid solution.

Список литературы

1. Структурные свойства $BaZr_xTi_{1-x}TiO_3$ и $BaSn_xTi_{1-x}TiO_3$ тонких пленок на монокристаллических подложках / А. В. Тумаркин, А. Г. Гагарин, М. В. Злыгостов, Н. А. Ялымов // Электроника и микроэлектроника СВЧ. 2018. Т. 1. С. 616–620.
2. Electrically tunable dielectric materials and strategies to improve their performances / L. B. Kong, S. Li, T. S. Zhang, J. W. Zhai, F. Y. C. Boey, J. Ma // Progress in Materials Science. 2010. Vol. 55, № 8. P. 840–893. doi: 10.1016/J.PMATSCI.2010.04.004
3. The properties of $BaSn_{0.15}Ti_{0.85}O_3$ thin film prepared by radio frequency magnetron sputtering from powder target / G. Zhu, Z. Yang, H. Yang, H. Xu, A. Yu // J. of the American Ceramic Society. 2010. Vol. 93, № 10. P. 2972–2974. doi: 10.1111/J.1551-2916.2010.03942.X
4. Maiti T., Guo R., Bhalla A. S. Evaluation of experimental resume of $BaZr_xTi_{1-x}O_3$ with perspective to ferroelectric relaxor family: an overview // Ferroelectrics. 2011. Vol. 425, № 1. P. 4–26. doi: 10.1080/00150193.2011.644168
5. Microstructure, dielectric properties and diffuse phase transition of barium stannate titanate ceramics / W. Cai, Yi. Fan, J. Gao, Ch. Fu, X. Deng // J. of Materials Science: Materials in Electronics. 2011. Vol. 22, № 3. P. 265–272. doi: 10.1007/S10854-010-0126-7
6. Broadband dielectric response of $Ba(Zr,Ti)O_3$ ceramics: from incipient via relaxor and diffuse up to classical ferroelectric behavior / D. Nuzhnyy, J. Petzelt, M. Savinov, T. Ostapchuk, V. Bovtun, M. Kempa, J. Hlinka, V. Buscaglia, M. T. Buscaglia, P. Nanni // Physical Review B. 2012. Vol. 86, № 1. P. 014106. doi: 10.1103/PHYSREVB.86.014106
7. Dielectric inspection of $BaZr_{0.2}Ti_{0.8}O_3$ ceramics under bias electric field: A survey of polar nano-regions / Q. Xu, D. Zhan, D. P. Huang, H. X. Liu, W. Chen, F. Zhang // Materials Research Bulletin. 2012. Vol. 47, № 7. P. 1674–1679. doi: 10.1016/J.MATERRESBULL.2012.03.062
8. Study on the influence of powder size on the properties of BTS/ITO thin film by RF sputtering from powder target / G. S. Zhu, H. R. Xu, J. J. Li, P. Wang, X. Y. Zhang, Y. D. Chen, D. L. Yan // Materials Lett. 2017. Vol. 194. P. 90–93. doi: 10.1016/J.MATLET.2017.02.003
9. Ansaree M. J., Upadhyay S. Study of phase evolution and dielectric properties of Sn-doped barium titanate // Emerging Materials Research. 2017. Vol. 6, № 1. P. 21–28. doi: 10.1680/JEMMR.16.00013
10. High tunability in (110)-oriented $BaZr_{0.2}Ti_{0.8}O_3$ (BTZ) lead-free thin films fabricated by pulsed laser deposition / Sh. Yu, R. Liu, L. Ge, L. Zhao, L. Li, Ch. Zhang, H. Zheng, Yo. Sun // Ceramics International. 2018. Vol. 44, № 3. P. 3005–3008. doi: 10.1016/J.CERAMINT.2017.11.055
11. Thickness dependence of microstructure, dielectric and leakage properties of $BaSn_{0.15}Ti_{0.85}O_3$ thin films / M. Wu, Ch. Zhang, Sh. Yu, L. Li // Ceramics International. 2018. Vol. 44, № 10. P. 11466–11471. doi: 10.1016/J.CERAMINT.2018.03.208
12. Ultra-high energy density thin-film capacitors with high power density using $BaSn_{0.15}Ti_{0.85}O_3/Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO_3$ heterostructure thin films / Sh. Yu, Ch. Zhang, M. Wu, H. Dong, L. Li // J. of Power Sources. 2019. Vol. 412. P. 648–654. doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2018.12.012
13. Xu L., Xu Y. Effect of Zr^{4+} content on crystal structure, micromorphology, ferroelectric and dielectric properties of $Ba(Zr_xTi_{1-x})O_3$ ceramics // J. of Materials Science: Materials in Electronics. 2020. Vol. 31, № 7. P. 5492–5498. doi: 10.1007/S10854-020-03114-2
14. Wu C., Yao M., Yao X. Dielectric tunable properties of $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ thin films derived from sol-gel soft chemistry // Ceramics International. 2021. Vol. 47, № 14. P. 20230–20238. doi: 10.1016/J.CERAMINT.2021.04.030
15. Wu C., Yao M. Dielectric tunable characteristics of compositional-gradient $BaTi_{1-x}Sn_xO_3$ thin films // J. of Advanced Dielectrics. 2021. Vol. 11, № 04. P. 2150019. doi: 10.1142/S20110135X21500193

Информация об авторах

Тумаркин Андрей Вилевич – кандидат технических наук (1999), доцент (2005), доктор технических наук (2017), профессор кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 100 научных и учебно-методических работ. Сфера научных интересов – технология и свойства функциональных материалов.
Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия

Электрически управляемые структуры на основе твердых растворов
 $BaZr_xTi_{1-x}O_3$ и $BaSn_xTi_{1-x}O_3$ для СВЧ-применений
Electric Tunable Structures Based on $BaZr_xTi_{1-x}O_3$
and $BaSn_xTi_{1-x}O_3$ Solid Solutions for Microwave Applications

E-mail: avtumarkin@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9858-3846>

Сапего Евгений Николаевич – исследователь (аспирантура Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), 2021), младший научный сотрудник (Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), 2019). Автор 15 научных работ. Сфера научных интересов – технология и свойства функциональных материалов.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: ensapego@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1124-4081>

Гагарин Александр Геннадиевич – кандидат технических наук (2007), доцент кафедры физической электроники и технологии Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор более 50 научных работ. Сфера научных интересов – применение сегнетоэлектриков в СВЧ-электронике.

Адрес: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина), ул. Профессора Попова, д. 5 Ф, Санкт-Петербург, 197022, Россия
E-mail: aggagarin@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5673-2372>

Мухин Николай Вячеславович – кандидат технических наук (2014), научный сотрудник Университета прикладных наук Бранденбурга. Автор более 100 научных работ. Сфера научных интересов – метаматериалы, композиты, фоновые кристаллы, пьезоэлектрики и сегнетоэлектрики, ультразвуковые сенсоры.

Адрес: Университет прикладных наук Бранденбурга, ул. Магдебургер, д. 50, Бранденбург-на-Гавеле, 14770, Германия
E-mail: mukhin.nikolay.v@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8709-6361>

References

1. Tumarkin A. V., Gagarin A. G., Zlygostov M. V., Yalymov N. A. Structural properties of $\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{TiO}_3$ and $\text{BaSn}_x\text{Ti}_{1-x}\text{TiO}_3$ thin films on single crystal substrates. *Elektronika i mikroelektronika SVCh* [Microwave Electronics and Microelectronics]. 2018, vol. 1, pp. 616–620. (In Russ.)
2. Kong L. B., Li S., Zhang T. S., Zhai J. W., Boye F. Y. C., Ma J. Electrically tunable dielectric materials and strategies to improve their performances. *Progress in Materials Science*. 2010, vol. 55, no. 8, pp. 840–893. doi: 10.1016/J.PMATSCI.2010.04.004
3. Zhu G., Z. Yang, H. Yang, H. Xu, A. Yu. The properties of $\text{BaSn}_{0.15}\text{Ti}_{0.85}\text{O}_3$ thin film prepared by radio frequency magnetron sputtering from powder target. *J. of the American Ceramic Society*. 2010, vol. 93, no. 10, pp. 2972–2974. doi: 10.1111/J.1551-2916.2010.03942.X
4. Maiti T., Guo R., Bhalla A. S. Evaluation of experimental resume of $\text{BaZr}_x\text{Ti}_{1-x}\text{O}_3$ with perspective to ferroelectric relaxor family: an overview. *Ferroelectrics*. 2011, vol. 425, no. 1, pp. 4–26. doi: 10.1080/00150193.2011.644168
5. Cai W., Fan Yi., Gao J., Fu Ch., Deng X. Microstructure, dielectric properties and diffuse phase transition of barium stannate titanate ceramics. *J. of Materials Science: Materials in Electronics*. 2011, vol. 22, no. 3, pp. 265–272. doi: 10.1007/S10854-010-0126-7
6. Nuzhnyy D., Petzelt J., Savinov M., Ostapchuk T., Bovtun V., Kempa M., Hlinka J., Buscaglia V., Buscaglia M. T., Nanni P. Broadband dielectric response of $\text{Ba}(\text{Zr},\text{Ti})\text{O}_3$ ceramics: from incipient via relaxor and diffuse up to classical ferroelectric behavior. *Physical Review B*. 2012, vol. 86, no. 1, pp. 014106. doi: 10.1103/PHYSREVB.86.014106
7. Xu Q., Zhan D., Huang D. P., Liu H. X., Chen W., Zhang F. Dielectric inspection of $\text{BaZr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{O}_3$ ceramics under bias electric field: A survey of polar nano-regions. *Materials Research Bulletin*. 2012, vol. 47, no. 7, pp. 1674–1679. doi: 10.1016/J.MATERRESBULL.2012.03.062
8. Zhu G. S., H. R. Xu H. R., Li J. J., Wang P., Zhang X. Y., Chen Y. D., Yan D. L. Study on the influence of powder size on the properties of BTS/ITO thin film by RF sputtering from powder target. *Materials Letters*. 2017, vol. 194, pp. 90–93. doi: 10.1016/J.MATLET.2017.02.003
9. Ansaree M. J., Upadhyay S. Study of phase evolution and dielectric properties of Sn-doped barium titanate. *Emerging Materials Research*. 2017, vol. 6, no. 1, pp. 21–28. doi: 10.1680/JEMMR.16.00013

10. Yu Sh., Liu R., Ge L., Zhao L., Li L., Zhang Ch., Zheng H., Sun Yo. High tunability in (110)-oriented BaZr_{0.2}Ti_{0.8}O₃ (BTZ) lead-free thin films fabricated by pulsed laser deposition. *Ceramics International*. 2018, vol. 44, no. 3, pp. 3005–3008. doi: 10.1016/J.CERAMINT.2017.11.055
11. Wu M., Zhang Ch., Yu Sh., Li L. Thickness dependence of microstructure, dielectric and leakage properties of BaSn_{0.15}Ti_{0.85}O₃ thin films. *Ceramics International*. 2018, vol. 44, no. 10, pp. 11466–11471. doi: 10.1016/J.CERAMINT.2018.03.208
12. Yu Sh., Zhang Ch., Wu M., Dong H., Li L. Ultra-high energy density thin-film capacitors with high power density using BaSn_{0.15}Ti_{0.85}O₃/Ba_{0.6}Sr_{0.4}TiO₃ heterostructure thin films. *J. of Power Sources*. 2019, vol. 412, pp. 648–654. doi: 10.1016/J.JPOWSOUR.2018.12.012
13. Xu L., Xu Y. Effect of Zr⁴⁺ content on crystal structure, micromorphology, ferroelectric and dielectric properties of Ba (Zr_xTi_{1-x})O₃ ceramics. *J. of Materials Science: Materials in Electronics*. 2020, vol. 31, no. 7, pp. 5492–5498. doi: 10.1007/S10854-020-03114-2
14. Wu C., Yao M., Yao X. Dielectric tunable properties of BaTi_{1-x}Sn_xO₃ thin films derived from sol-gel soft chemistry. *Ceramics International*. 2021, vol. 47, no. 14, pp. 20230–20238. doi: 10.1016/J.CERAMINT.2021.04.030
15. Wu C., Yao M. Dielectric tunable characteristics of compositional-gradient BaTi_{1-x}Sn_xO₃ thin films. *J. of Advanced Dielectrics*. 2021, vol. 11, no. 04, pp. 2150019. doi: 10.1142/S2010135X21500193

Information about the authors

Andrey V. Tumarkin, Cand. Sci (Eng.) (1999), Docent (2005), Dr Sci. (Eng.) (2005), Professor at the Department of Physical Electronics and Technology of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 100 scientific publications and guidance manuals. Area of expertise: technology and properties of functional materials.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: avtumarkin@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0001-9858-3846>

Evgeny N. Sapego, Postgraduate (2021), Researcher Assistant (2019) of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of 15 scientific publications. Area of expertise: technology and properties of functional materials.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: ensapego@yandex.ru
<https://orcid.org/0000-0002-1124-4081>

Alexander G. Gagarin, Cand. Sci (Eng.) (2007), Associate Professor at the Department of Physical Electronics and Technology of the Saint Petersburg Electrotechnical University. The author of more than 50 scientific publications. Area of expertise: application of ferroelectrics in SHF electronics.

Address: Saint Petersburg Electrotechnical University, 5 F, Professor Popov St., St Petersburg 197022, Russia
E-mail: aggagarin@etu.ru
<https://orcid.org/0000-0001-5673-2372>

Nikolay V. Mukhin, Cand. Sci (Eng.) (2014), Research Officer of the University of Applied Sciences Brandenburg. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: complex issues of radar, antenna systems.

Address: University of Applied Sciences Brandenburg, 50, Magdeburger St., Brandenburg an der Havel 14770, Germany
E-mail: mukhin.nikolay.v@gmail.com
<https://orcid.org/0000-0002-8709-6361>